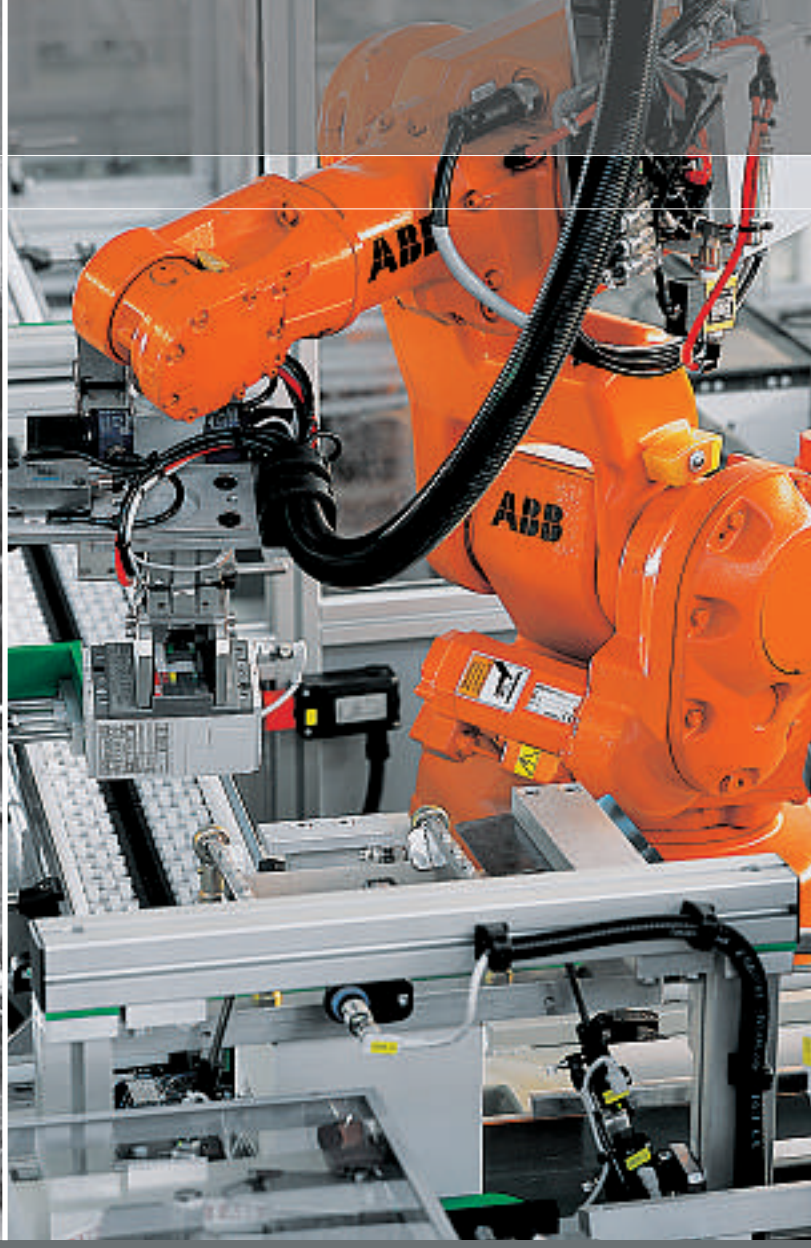



# La science manufacturière

## Comprendre les lois physiques fondamentales qui gouvernent la production industrielle

**Fredrik Nordström, Piotr Gawad, Adam Nowarski**

**Depuis la nuit des temps, l'homme a toujours «fabriqué» quelque chose. Bien sûr, l'art de la manufacture a connu de profondes mutations et son évolution est permanente. Chaque époque a vu naître son lot de théories et d'expressions prétendant résoudre comme par enchantement tous les problèmes des industriels, aussitôt remplacées par de meilleures idées et des vocables plus à la mode.**

**Cependant, une bonne connaissance des lois fondamentales régissant les processus de fabrication est indispensable pour permettre aux industriels de jongler savamment entre des théories et des outils différents, contenant tous une part de vérité. En d'autres termes, ils doivent maîtriser la «science manufacturière».**

Le terme de «science manufacturière» désigne les lois physiques fondamentales qui gouvernent un processus manufacturier au sens large, c'est-à-dire comment les différents éléments d'une ligne de production fonctionnent ensemble en tant que système. Prenons les anciens Egyptiens : ils étaient capables d'appliquer des lois de la physique pour construire les pyramides. Mais ces bâtisseurs de génie n'étaient, à l'époque, pas confrontés aux problématiques de gestion et de dynamique des flux propres à la production de masse et aux processus continus, apparus avec la Révolution industrielle.

Jusqu'au milieu du 18e siècle, les biens étaient généralement fabriqués à la pièce par des artisans chevronnés. Diverses inventions, et notamment l'essor de la mécanisation, conduisirent ensuite à la Révolution industrielle, les grandes usines de production de masse supplantant la fabrication artisanale. L'une des avancées les plus importantes de cette époque fut la machine à vapeur de James Watt (1776) qui affranchit les industriels de l'obligation de s'implanter à proximité d'un cours d'eau. Cette énergie moins chère leur permit en outre de baisser leurs coûts de production et le prix de vente de leurs produits.

L'armurier Eli Whitney fut à l'origine d'un progrès important au tournant du siècle (1799–1801), en introduisant le principe de pièces interchangeables : les objets purent ainsi être assemblés et réparés rapidement sans nécessairement dépendre du savoir-faire d'un artisan qualifié. L'invention de machines et de gabarits pour fabriquer les différentes pièces d'une arme accéléra ce mouvement de standardisation et, dès le début du 19e siècle, jeta les bases des futures chaînes de montage.

D'autres progrès tels que les chemins de fer et le télégraphe eurent une influence déterminante sur le développement industriel, créant les réseaux de transport et d'échanges de biens et d'information.

La seconde révolution industrielle se produisit lorsque tous les éléments indispensables à la production de masse et à la distribution furent réunis, donnant ainsi naissance aux entreprises intégrées et modernes d'aujourd'hui.

### L'avènement de la production de masse

Henry Ford est sans conteste la figure emblématique de la production de masse, de la standardisation des produits fabriqués avec des machines spécialisées et sur des chaînes de montage mobiles. C'est en 1913 qu'il mit en route la première chaîne mobile dans son usine automobile, éliminant manutentions et temps d'attente inutiles entre chaque poste de travail grâce à l'introduction de convoyeurs mécaniques. En fait, Ford mit en pratique les théories développées par Frederick Winslow Taylor en 1911 dans son ouvrage sur l'organisation scientifique du travail : il créa ainsi un flux continu en «apportant le travail à l'ouvrier», plutôt qu'en «amenant l'ouvrier au travail». Cette innovation fut à l'origine de la production au plus juste, ou *lean production* en anglais, principe axé sur l'élimination des gaspillages (activités sans valeur ajoutée) et plus tard copié et perfectionné par Taiichi Ohno, chez Toyota.

Avec le recul, il semble cependant que, pour Ford lui-même, le convoyeur mécanique n'était qu'un outil au service d'un objectif plus important : raccourcir les délais. Il pensait en effet que l'accélération des cadences aurait un impact positif sur la production et les stocks, et espérait ainsi maintenir ses coûts à un niveau plus faible que ses concurrents.

### La découverte de l'importance de la variabilité

Tandis que Henry Ford réduisait la variabilité du produit au minimum absolu en ne fabriquant que des voitures de couleur noire pour accélérer la production et réduire les coûts, d'autres industriels s'attachaient à peaufiner leurs processus pour améliorer la fiabilité des produits. Ainsi, les ingénieurs des laboratoires de Bell Western Electric testèrent différents aménagements des processus pour tenter d'améliorer la qualité de leurs réseaux de transmission, avec un succès plus que mitigé. Le statisticien Walter A. Shewhart en conclut que tout aménagement apporté à un processus pour corriger des fluctuations comprises dans la fourchette moyenne de variabilité aléatoire ne ferait qu'accroître ces fluctuations, donc dégraderait au final la performance du processus. Autrement dit, l'intuition et les bonnes intentions ne permettent que de procéder par tâtonnements, ce qui équivaut à naviguer en eaux inconnues sans carte ni compas. Ses recherches donnèrent naissance à la *maîtrise statistique des procédés* (MSP)[1], plus tard adaptée et perfectionnée par deux anciens col-

Assemblage des générateurs à Baden (Suisse) en 1895

laborateurs de Western Electric, les Dr W. Edwards Deming et Joseph M. Juran.

Publiés en 1931 sous le titre «Contrôle économique de la qualité des produits manufacturés», les travaux de Shewhart constituent une contribution majeure au développement de la science manufacturière.

A cet égard, les outils modernes de contrôle de la qualité, tels que la méthode Six Sigma Encadré 1, sont les héritiers directs de ces découvertes.

**Réductionnisme vs systémisme**

Dans sa quête de mise au point des bonnes pratiques de fabrication, Frederick Winslow Taylor divisa le système de production en tâches élémentaires – l'approche réductionniste – pour accroître l'efficience globale en perfectionnant chaque tâche séparément. Il inventa ainsi des montages, des outillages de bridage et autres dispositifs qui lui valurent le titre de «père de l'organisation scientifique du travail».

L'approche réductionniste est tout à fait adaptée à l'analyse des tâches individuelles aboutissant à la fabrication d'un article ou à son assemblage. Or l'efficience globale ne saurait reposer sur celle de chacune des tâches élémentaires, mais plutôt sur l'analyse du mode d'interaction entre celles-ci et avec d'autres sous-systèmes pour former un processus de production. L'optimisation de la performance est subordonnée à l'atteinte globale des objectifs du système.

A l'instar de la plupart des systèmes naturels, un système de production est interdépendant des événements et

## Encadré 1 La gestion des variations au service de la qualité

Aujourd'hui, les usines appliquent souvent des technologies sophistiquées de mesure et de contrôle de la productivité et de la qualité, considérées comme indispensables dans un monde industriel où dirigeants et opérateurs cherchent sans cesse à accroître la performance de l'outil de production.

Nombreux sont les paramètres qui concourent à l'efficience d'un processus de fabrication d'un produit de qualité exceptionnelle. A cet égard, les méthodes et outils modernes – Six Sigma, plans d'expérience, MSP, etc. – s'avèrent très utiles.

Six Sigma est l'un des outils les plus réputés: il s'agit d'une démarche rigoureuse basée sur l'analyse de données et visant à éliminer les défauts de chaque processus. Pour obtenir une qualité Six Sigma, un processus ne doit pas produire plus de 3,4 défauts par million d'opportunités (DPMO).

Pour bien comprendre chaque processus et progresser en permanence, la démarche Six Sigma impose de collecter, de mettre en forme et d'analyser les données.

La représentation statistique correspondante décrit quantitativement le fonctionnement d'un processus. Les outils statistiques et de résolution de problèmes sont communs à d'autres démarches de progrès, mais Six Sigma insiste sur l'application méthodique et systématique de ces outils et permet d'obtenir des améliorations spectaculaires dont l'impact sur le résultat net est immédiatement visible.

L'amélioration de la qualité des processus par la démarche Six Sigma suppose la mise en application d'une feuille de route, baptisée DMAIC pour *Define, Measure, Analyze, Improve and Control*. Il s'agit d'un système d'amélioration systématique des processus dont les résultats sont inférieurs aux seuils de qualité requis.

Six Sigma s'appuie sur plusieurs outils statistiques, mais la MSP avec ses graphiques de contrôle 1 reste l'instrument privilégié de maîtrise de la variabilité d'un processus.

La MSP représente un processus sous forme graphique et détermine rapidement s'il est «non contrôlé» (lorsqu'une cause spéciale de variation est détectée, par exemple). Ce processus est alors analysé grâce à un ou plusieurs outils de résolution de problèmes (Pareto, plan d'expérience, diagramme cause-effet, analyse des modes de défaillance et de leurs effets [AMDE]) pour identifier la cause première de cette dérive. Une stratégie est alors élaborée pour l'éliminer et l'efficacité des changements est vérifiée par la MSP 2.

Les variations peuvent être de deux ordres: d'une part les fluctuations naturelles, aussi appelées causes communes ou variations aléatoires (fluctuations inhérentes à tout processus) et, d'autre part, celles dues à une cause spéciale, généralement un problème particulier ou une situation exceptionnelle affectant le processus.

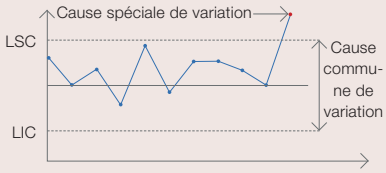
La méthode Six Sigma est couramment mise en œuvre au sein des sites de production en flux continus ou discontinus. ABB a d'ailleurs constaté les bénéfices considérables de cette démarche et de la MSP dans ses propres usines, en termes de qualité et de rentabilité.

Un système MSP destiné à surveiller et analyser les processus de fabrication discontinue a été mis au point par les chercheurs du Groupe. Cette méthode éprouvée mais déjà ancienne retrouve ainsi une nouvelle jeunesse qui permet de l'appliquer facilement et de garantir l'efficacité de cet outil d'aide à la décision. Il est actuellement en cours de déploiement avec le système MES (*Manufacturing Execution System*) d'ABB. En outre, dans le cadre du Programme d'excellence industrielle du Groupe, un projet a récemment été lancé pour promouvoir l'usage de la MSP dans les systèmes de production discontinue.

variations qu'il subit. Ceux-ci n'étant pas isolés, une approche systémique est indispensable pour déterminer comment améliorer la performance globale: tel est le constat partagé par plusieurs grands chercheurs du 20e siècle, parmi lesquels W. Edwards Deming, Jay Forrester, Peter Senge et Eli Goldratt.

Prenons l'exemple d'une autoroute à l'heure de pointe: chaque mouvement d'une voiture est un événement dépendant du déplacement des autres véhicules. Dans cet exemple, les variables sont les différences de temps de réaction, d'aptitude des conducteurs, de performances des véhicules, d'état des pneus et de conditions climatiques. A un moment donné, l'augmentation du nombre de véhicules entraîne une congestion qui ralentit le flux. Un «effet d'accordéon» amplifie le phénomène, les conducteurs étant obligés d'adapter constamment leur conduite pour suivre le mouvement irrégulier du trafic.

1 Graphique de contrôle – Causes communes et spéciales des variations




Les lignes de production sont soumises aux mêmes contraintes. L'accumulation de tâches dans un atelier ralentit, voire interrompt le flux et dégrade la productivité globale. C'est là que l'approche réductionniste heurte de front l'approche systémique: en augmentant sans cesse l'efficience de chacun des sous-processus, l'atelier doit absorber trop de tâches pour ne pas ralentir les flux. Résultat: des en-cours excessifs, des délais de production allongés, des coûts plus élevés et, évidemment, une baisse de l'efficience globale. Il s'agit là d'un autre exemple de l'effet néfaste de l'intuition et des bonnes intentions, à défaut de connaissance approfondie des interactions fondamentales.

Les longues chaînes logistiques sont plus gravement touchées par l'effet accordéon, dans ce cas appelé «effet coup de fouet». Tout ralentissement des flux physiques et d'informations fait fluctuer les stocks, donc la disponibilité des composants. La clé d'une gestion industrielle efficace suppose donc la compréhension des variations et de leurs effets sur l'ensemble du système de production et d'approvisionnement.

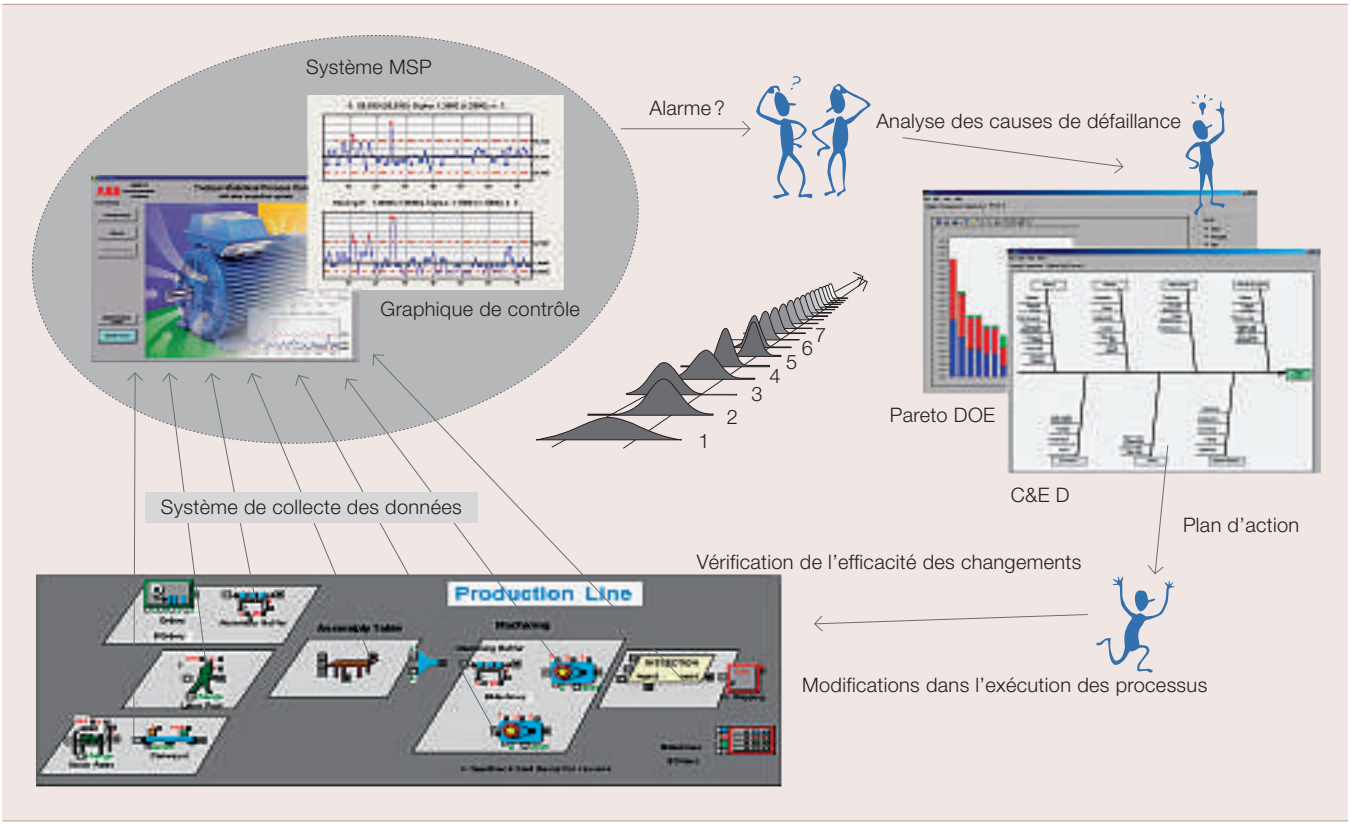
### La gestion des variations au service des flux

Selon l'une des grandes lois de la fabrication, l'augmentation de la variabilité dégrade toujours la performance d'un système de production. Par conséquent, toute réduction de la variabilité simplifie la gestion et l'amélioration des processus industriels. Si Henry Ford et le célèbre système de production de Toyota se sont sans aucun doute inspirés de ce principe, ils n'ont toutefois apparemment pas pensé qu'un système extrêmement variable peut potentiellement être amélioré en gérant intelligemment ces variations.

### Les concepts de la gestion des variations

Ce n'est que vers la fin du siècle dernier que les industriels ont pris conscience

2 Boucle de réduction de la variabilité – Feuille de route de la MSP



de l'intérêt de fabriquer une gamme de produits finis à partir de plates-formes communes de composants standard. Mais pour se lancer dans cette voie, deux options sont a priori contradictoires : réduire les variations ou … les gérer 3. Afin de tirer parti de ces deux possibilités, ABB a mis au point le concept CP3[1] (*Common Pull Production Practices*). Sous-tendu par les principes de fabrication au plus juste[1] et par la théorie des contraintes[1], ce concept agit sur trois leviers : gestion de la production, maîtrise des flux matières et d'informations au sein de l'usine et intégration des processus fournisseurs dans le système de production.

Dans une production en flux tirés, ce sont les commandes des clients qui déclenchent la mise en fabrication, à l'inverse des systèmes où les pièces sont produites selon un programme prédéfini. Le processus de production est donc plus cohérent.

L'originalité du concept CP3 réside dans la gestion des en-cours en flux tirés, en application d'une autre relation physique fondamentale, la loi de Little cf. encadré 2 :

En-cours[1] = cadence de production × délai de production[1]

Il existe bien d'autres lois ou relations régissant les opérations manufacturières et nombre d'entre elles – cf. tableau 1 [2] – sont liées à celles énoncées plus haut. La compréhension de ces lois physiques est le préalable indispensable à une gestion efficace de la production.

### Environnements de production

Il est essentiel de bien comprendre les spécificités de chaque environnement de production car les variations et la nature des interactions entre les tâches diffèrent. Examinons tout d'abord la structure des processus 4 :

Au début du 20ème siècle, les moteurs électriques ont commencé à remplacer les machines à vapeur comme force motrice. Les moteurs à courant alternatif BBC monophasés, diphasés et triphasés ont joué un rôle important dans ce développement.

## Encadré 2 Loi de Little

La loi de Little établit que, quelle que soit la cadence de production, le délai de production moyen est directement proportionnel au volume des en-cours. Cette loi a plusieurs implications importantes :

- D'une part, si le délai de production est augmenté, un même volume de production exigera davantage d'en-cours. A l'évidence, les temps d'attente ajoutés aux systèmes PGI pour compenser les variations quotidiennes de temps de cycle constituent l'une des causes majeures d'en-cours excessifs dans de nombreuses usines.
- D'autre part, cette loi signifie que la production peut être accélérée en limitant le nombre de tâches. Ainsi, en « plafonnant » les en-cours, les flux pourront être considérablement accélérés.

La loi de Little est en quelque sorte la « loi d'Ohm » de la fabrication :

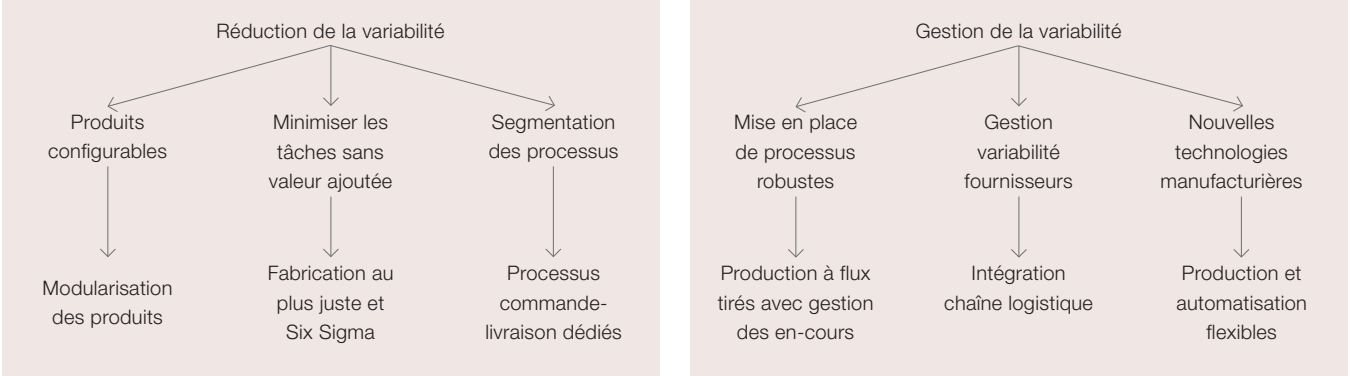
- Si $R = \frac{V}{I}$, alors $TPT = \frac{WIP}{PR}$ soit **R (résistance)** le temps nécessaire – le cheminement – d'un produit dans le système de fabrication.
- WIP (en-cours) le **potentiel** de production en attente d'exécution dans le système.
- PR la cadence – **flux** – de production.

**Notes**

[1] Cf. glossaire p. 74. La théorie des contraintes est expliquée en p. 25.

[2] D'après *Factory Physics*, Hopp and Spearman, 2000 2nd edition.

3 Réduire ou gérer les variations ?



Les environnements de production du coin supérieur gauche du schéma sont caractérisés par une variation bien plus élevée que ceux du coin inférieur droit. Le schéma montre par ailleurs que la fabrication d'un nouveau produit initialement en petites quantités se situera en haut à gauche.

**Tableau 1** Plusieurs lois et relations fondamentales régissant les opérations manufacturières

**Loi (Variabilité) :**
L'augmentation de la variabilité dégrade toujours la performance d'un système de production.

**Corollaire (localisation de la variabilité) :**
Considérant que les dates de lancement en fabrication d'un produit sont indépendantes des dates d'achèvement, une variabilité en début de ligne aura davantage d'impact sur le temps de cycle qu'une variabilité équivalente intervenant plus tard dans le processus.

**Loi (gestion de la variabilité) :**
Dans un système de production, la variabilité peut être aplanie ou gérée en agissant sur les stocks, la capacité et le temps.

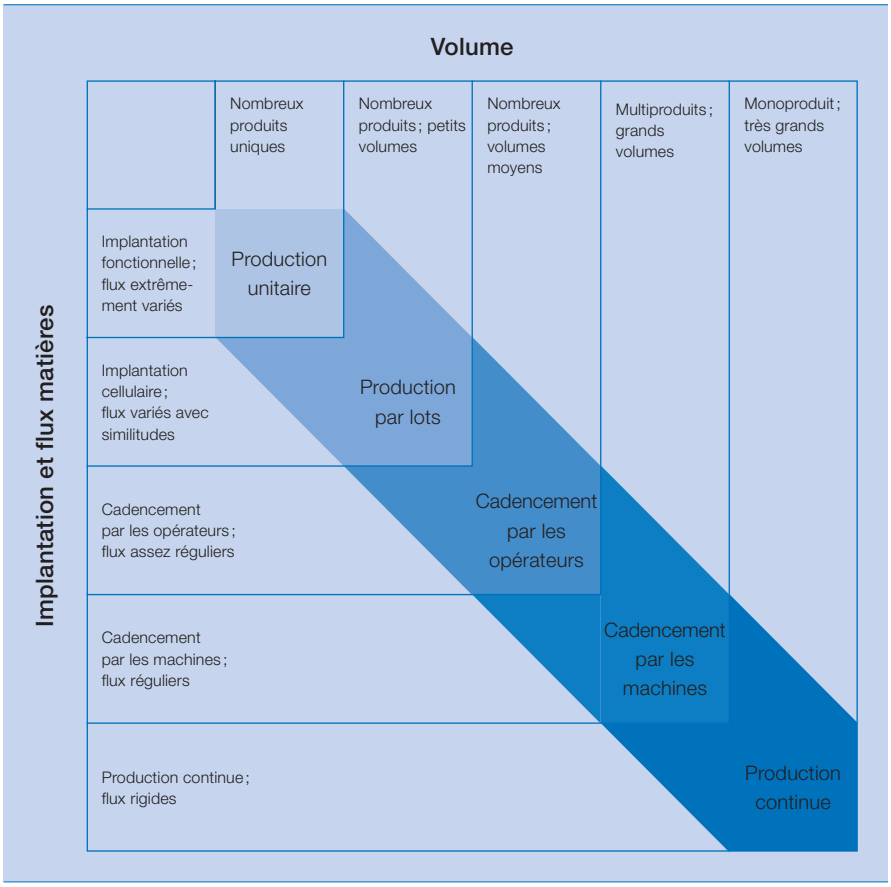
**Corollaire (régulation par la flexibilité) :**
La flexibilité réduit l'ampleur de la gestion de la variabilité requise par un système de production.

**Loi (Capacité) :**
En production stable, le rythme moyen des lancements en fabrication sera toujours inférieur à la capacité moyenne de l'usine.

**Loi (Taux d'utilisation) :**
L'augmentation du taux d'utilisation d'un poste de travail, sans autres adaptations, accroît les en-cours moyens et le délai de production selon une courbe hautement non linéaire.

**Loi (Opérations d'assemblage) :**
La performance d'un poste d'assemblage est dégradée par l'augmentation de l'un des éléments suivants :
- nombre de composants à assembler ;
- variabilité de l'arrivée des composants ;
- défaut de coordination entre les arrivées de composants.

**4** Matrice des environnements de production
(source : J Miltenburg, 1995 : *How to formulate and implement a winning plan*)




Après lancement réussi du produit et une fois résolus les défauts d'origine de la production par approche systémique, celui-ci pourrait se déplacer peu à peu vers le coin inférieur droit.

Cette figure n'illustre qu'un seul point de vue et il en existe bien d'autres. Mais l'enseignement essentiel qu'on peut en tirer est que chaque environnement de production est unique. Avant toute chose, il faut bien comprendre les lois physiques fondamentales qui gouvernent chacun des processus et notamment leur mode d'interaction au sein d'un système, en s'attachant tout particulièrement à la nature des variations. A défaut, toute action intuitive ne pourra que nuire à la performance globale du système.

Le défi de la variabilité, quant à lui, peut être relevé en utilisant les outils appropriés pour améliorer significativement la performance du processus. Avec le CP3 par exemple, d'excellents résultats peuvent être obtenus en six mois seulement. Enfin, la maîtrise des lois physiques fondamentales et leur application à toutes les fonctions de l'entreprise sont une source de progrès encore plus grands. Mais c'est une autre histoire.

**Fredrik Nordström**
ABB Oy, ABB Corporate Research
Vasaa (Finlande)
fredrik.nordstrom@fi.abb.com

**Piotr Gawad**
ABB Sp. z o.o.
ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)
piotr.gawad@pl.abb.com

**Adam Nowarski**
ABB (China) Limited
ABB Corporate Research
Beijing (Chine)
adam.nowarski@cn.abb.com